

# Comment ça marche ?

## Les lignes HF

### 14 - Adaptation par lignes (2)

Par le radio-club F6KRR

*Après avoir vu plusieurs exemples d'adaptation à l'aide de lignes employées en transmission, nous allons continuer l'adaptation avec des lignes utilisées en remplacement de composants réactifs passifs.*

#### Synthèse des bobines et des condensateurs

##### *Utilisation de lignes ouvertes et fermées de longueurs $< \lambda/4$*

Pour simplifier, nous supposons que les pertes dans la ligne sont négligeables, ce qui peut être admis pour une longueur inférieure au quart d'onde.

Nous avons vu qu'une ligne était composée d'une self linéique  $L_1$  et d'une capacité linéique  $C_1$ . Quand la ligne est infinie ou si elle est chargée par son impédance caractéristique, quelle que soit sa longueur  $L$ , les réactances de sa self  $L=L_1 \times L$  et de sa capacité  $C=C_1 \times L$  se compensent à son entrée. Ce n'est plus le cas quand la charge est très différente de son impédance caractéristique, en particulier quand elle est nulle (ligne fermée) ou infinie (ligne ouverte). Dans ces deux cas, la ligne présente à son entrée une impédance réactive pure.

Pour une longueur électrique inférieure à  $\lambda/4$ , une ligne ouverte à son extrémité se comporte comme un condensateur et une ligne fermée ( $C/C$ ) se comporte comme une bobine. Nous pourrions alors toujours remplacer une bobine ou un condensateur par une ligne, avec certaines limites toutefois.

##### *Détermination de la valeur de la capacité ou de la self équivalente en fonction des caractéristiques de la ligne et de la fréquence.*

Contrairement à un condensateur ou à une bobine idéale, la capacité ou la self équivalente d'une ligne dépend non seulement de sa longueur et de son impédance caractéristique, mais aussi de la fréquence. En effet, c'est la valeur et le signe de la réactance présentée par la ligne à son entrée qui détermine un comportement équivalent à un condensateur ou à une bobine. La valeur du composant obtenu n'est exacte que pour la fréquence de travail. On pourrait croire qu'elle soit proportionnelle à la longueur de la ligne, mais cela ne serait le cas qu'en courant continu.

Pour comprendre la loi de variation de la valeur équivalente, il suffit de se souvenir qu'elle est le résultat de l'addition des deux réactances présentées par la ligne, réactances liées à la capacité linéique  $C_1$  et à la self linéique  $L_1$ , soit :

$X = (+X_L) + (-X_C)$  avec :

$L = L_1 \times L$  et  $C = C_1 \times L$ .

Ceci nous conduit à la courbe de la figure 1 qui définit un facteur multiplicatif à appliquer aux valeurs calculées à partir des constantes linéiques, selon la longueur relative d'une ligne  $< \lambda/4$ .

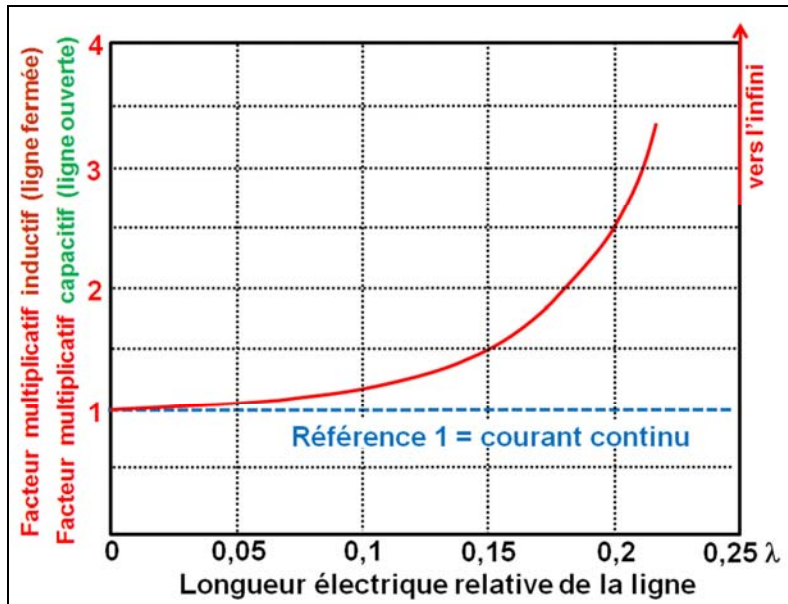


Figure 1 : Facteur multiplicatif à appliquer aux valeurs calculées en courant continu

N-B : La courbe ne tient pas compte des pertes (faible effet en pratique) <sup>(1)</sup>.

Utilisation de l'abaque :

Lorsqu'on a la valeur du composant (L ou C) à synthétiser, on calcule une longueur initiale pour la ligne en divisant la valeur désirée par la constante linéique de la ligne. On reporte cette longueur sur l'abaque et on lit le facteur multiplicatif. Alors on diminue la longueur pour retrouver la valeur recherchée, facteur multiplicatif compris. Cela ne demande que quelques itérations.

### Application à l'accord d'une antenne

Nous allons nous intéresser à un cas particulier où la partie réelle de l'impédance d'antenne a une valeur inférieure aux 50 Ω du câble coaxial. Pour le constructeur d'antennes, ce cas se rencontre principalement dans l'adaptation d'un monopôle raccourci et dans celle d'une antenne YAGI. On peut alors se débrouiller pour que l'antenne présente une réactance telle que l'adaptation puisse se faire avec un seul composant, soit une bobine, soit un condensateur, composant que l'on synthétisera avec une ligne <sup>[1]</sup>.

#### Cas d'un monopôle vertical au sol

Le schéma équivalent d'une telle antenne se trouve sur la figure 2.

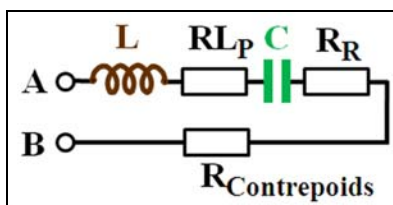


Figure 2 : Schéma équivalent d'un monopôle vertical au sol

La bobine L est la bobine "d'allongement" de l'antenne pour obtenir la résonance avec sa capacité C.

Soit un monopôle au sol d'une hauteur de  $\lambda/8$  pour le 160m (F=1,85 MHz). Sa résistance de rayonnement  $R_R$  est de 6 Ω. Elle présente une capacité C de 189,8 pF ayant une réactance de -453Ω. Celle-ci est compensée par une bobine L en pied de 39μH (même réactance) avec un Q

de 100, soit une résistance de pertes  $RL_P$  de  $4,5\Omega$ . Une autre résistance de pertes  $R_C$  de  $14,5\Omega$  a été obtenue pour le contreponds (radians enterrés). Dans ce cas l'impédance de l'antenne est égale à  $6\Omega + 4,5\Omega + 14,5\Omega = 25\Omega + j0$  (car à la résonance) <sup>(2)</sup>.

Nous aurons deux possibilités pour "remonter" cette impédance à  $50\Omega$ . Soit on augmentera la valeur de  $L$  de manière à avoir une réactance positive particulière de l'antenne, que l'on compensera avec un condensateur en parallèle sur A-B. Soit on diminuera la valeur de  $L$  de manière à avoir une réactance négative particulière de l'antenne, que l'on compensera avec une bobine en parallèle sur A-B. Pour calculer la valeur du composant on se servira des formules générales suivantes :

$LC\omega^2 = 1$  avec  $\omega = 2\pi F$  et  $F = F_0$  (résonance).

$C = 1 / (2\pi F \times X_C)$ , avec  $F$  en MHz et  $C$  en  $\mu F$ .

$L = X_L / 2\pi F$ , avec  $F$  en MHz et  $L$  en  $\mu H$ .

Formules spécifiques au problème :

Soit  $X_P$  la réactance ( $\pm j$ ) en parallèle sur A-B et  $X_C$  la réactance ( $\pm j$ ) en série avec la charge (couples utilisés :  $+X_P$  et  $-X_C$  ou  $-X_P$  et  $+X_C$ ). Nous avons :

$$X_P = Z_0 \times \sqrt{\frac{R}{Z_0 - R}} \quad (1)$$

Dans laquelle  $Z_0$  est l'impédance (réelle) que l'on veut obtenir et  $R$  est la partie réelle de l'impédance de la charge.

Ici  $X_P = 50 \times \text{racine de } [25 / (50 - 25)] = \pm j50 \Omega$  (condensateur de  $1721 \text{ pF}$  ou bobine de  $4,3 \mu H$  pour  $F_0 = 1,85 \text{ MHz}$ ).

Puis nous calculons :

$$X_C = \frac{Z_0 \times R}{X_P} \quad (2)$$

Ici  $X_C = 50 \times 25 / 50 = \pm j25 \Omega$  (capacité de  $3442 \text{ pF}$  ou inductance de  $2,15 \mu H$  pour  $F_0 = 1,85 \text{ MHz}$ ).

Dans le cas d'un monopôle raccourci, c'est la solution avec réduction de la valeur de la bobine série (l'ensemble devient capacitif) et bobine d'adaptation en parallèle qui est préférée car elle a l'avantage de relier électriquement le fouet à la terre (sécurité électrique).

Pour rendre l'antenne capacitive, il suffit de soustraire  $2,15 \mu H$  des  $39 \mu H$  de la bobine d'accord du fouet, ce qui nous donne une bobine de  $36,85 \mu H$ . Puis on ajoute une bobine de  $4,3 \mu H$  en parallèle sur A-B. Nous obtenons le schéma de la figure 3.

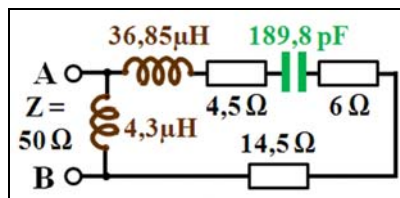


Figure 3 : Schéma équivalent du monopôle V au sol avec adaptation  $50 \Omega$

La synthèse de la bobine de  $4,3 \mu H$  pourrait se faire à l'aide d'une ligne court-circuitée à son extrémité. Sa longueur électrique serait égale à  $4,3 \mu H$  divisé par la constante linéique de la ligne, en tenant compte du facteur multiplicatif relevé sur la figure 1.

### Cas de la Yagi

C'est la même méthode que pour le monopôle au sol, mais là, on diminuera un peu la longueur du radiateur pour rendre l'antenne capacitive afin de retrouver l'accord avec la bonne impédance à l'aide d'une ligne fermée (hairpin).

### Adaptation avec seulement deux lignes (monopôle au sol).

La méthode consiste à connecter à l'antenne seule, une ligne d'impédance particulière avec une longueur telle que la partie réelle  $G$  ramenée à son extrémité soit égale à  $0,02S$ . Ensuite il suffit de compenser la réactance parallèle par un tronçon de ligne fermée (inductive). Voir sur la figure 4 les opérations à effectuer.

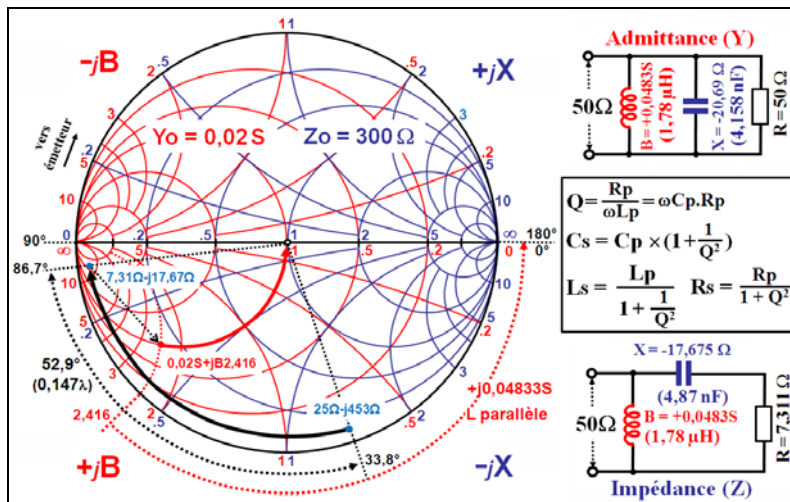


Figure 4 : Exemple d'allongement électrique d'une antenne courte à l'aide d'une ligne en transmission, puis adaptation par ligne fermée en parallèle (synthèse d'une bobine). Attention :  $0,02S$  correspond à  $50\Omega$  et pas à  $300\Omega$ , d'où le déplacement du point d'impédance en bout de ligne  $300\Omega$

On utilise un abaque de Smith Z-Y pour déterminer la longueur de la ligne en transmission <sup>(3)</sup>. On ajoute sur l'abaque une graduation angulaire sur  $180^\circ$  ( $\lambda/2$ ) qui démarre (pour une ligne ouverte) depuis  $G=0$ . On a choisi une impédance  $Z_0 = 300\Omega$ , car la ligne est facile à fabriquer si elle est asymétrique. Pour le diagramme Y, on prend  $Y_0 = 0,02S$  qui correspond aux  $50\Omega$  que l'on cherche à obtenir. Détail des opérations sur l'abaque de Smith :

- On place sur le diagramme  $Z_0=300\Omega$  le point d'impédance de l'antenne :  $25\Omega - j453\Omega$ .
- A l'aide d'un compas, on trace le cercle de ROS constant qui passe par ce point jusqu'à rencontrer le cercle de conductance 6 qui correspond à  $G = 0,02S$  ( $6/300$ ). La longueur angulaire de la ligne est de  $86,7^\circ - 33,8^\circ = 52,9^\circ$ , soit  $0,147\lambda$ . A  $1,85\text{ MHz}$ , cela correspond à  $23,84\text{ m}$  électrique <sup>(4)</sup>.
- On relève en ce point une susceptance de  $14,5$ , soit  $0,04833S$  ( $14,5/300$ ).
- Reporté sur le diagramme  $Y_0=0,02S$ , ce point se retrouve à l'intersection de  $G = 1$  et  $B = +2,416$ .
- A  $1,85\text{ MHz}$ , pour éliminer cette réactance capacitive de  $1 / (2,416 \times 0,02S) = -20,69\Omega$  (soit pour compenser une capacité de  $4,158\text{ nF}$ ), il suffit de disposer en parallèle une inductance ayant une réactance de  $+20,69\Omega$ , soit  $1,78\mu\text{H}$  (cf. le schéma "Admittance" de la fig. 4).

Détail des opérations sur le terrain :

- Après avoir érigé l'antenne avec son réseau de radiaux, on mesure son impédance à l'aide d'un pont d'impédance ou d'admittance ou d'un bon VNA.
- On détermine la longueur de la ligne à l'aide de l'abaque de Smith.

- On fabrique une ligne  $300 \Omega$  asymétrique à l'aide d'un grillage en cuivre étamé à mailles serrées d'une largeur de 30 cm minimum, plaqué au sol sur toute sa longueur. Puis on dispose, au centre du grillage et à une hauteur de 10,3 cm, un fil de cuivre de  $6\text{mm}^2$  maintenu à l'aide d'entretoises isolantes.
- On mesure l'impédance de la ligne en y connectant à une extrémité une résistance variable (potentiomètre cermet  $470\Omega$ ) et à l'autre un VNA. On règle le potentiomètre pour lire au VNA une résistance pure égale à celle du potentiomètre. C'est l'impédance de la ligne.
- On refait un RUN pour obtenir la longueur de la ligne en fonction de cette impédance.
- On taille la ligne un peu plus longue et on la connecte à l'antenne.
- On recherche le point sur la ligne où l'on mesure l'impédance attendue. On l'obtient par transformation de l'admittance calculée (cf. le schéma "impédance" de la fig. 4) <sup>[2]</sup>.
- A partir de cette impédance, on calcule à l'aide la formule (1) ou du relevé (+B) sur l'abaque de Smith, la valeur de l'inductance à mettre en parallèle, soit  $1,78 \mu\text{H}$ .

N-B : Les deux schémas sur la figure 4 sont deux exemples de combinaisons d'une résistance et d'un condensateur présentant la même impédance (ou la même admittance) d'un dipôle (formules de transformation en encadré sur la figure 4). Avec une bobine de  $1,78 \mu\text{H}$  en parallèle, on obtient une impédance finale de  $50\Omega +j0$ .

### ***Fabrication de l'inductance de $1,78 \mu\text{H}$ .***

On peut utiliser la même ligne asymétrique  $300 \Omega$ , court-circuitée à son extrémité. Elle aura une longueur électrique de  $1,78 \text{m}$  car elle a une inductance linéique de  $1\mu\text{H}/\text{m}$ . On peut plus simplement utiliser un câble coaxial RG213 d'une longueur physique de  $6,47 \text{m}$  <sup>(5)</sup>. Là aussi, tailler plus long, et raccourcir pour obtenir le plus faible ROS mesuré au VNA.

Nous arrêterons là la méthodologie, car le but de cette rubrique est simplement de faire savoir "comment ça marche" et les exemples de réalisations ne sont que des cas d'école destinés à faciliter la compréhension.

Concernant l'adaptation, nous retiendrons les quatre règles suivantes :

- L'utilisation d'une réactance série ne modifie pas la valeur résistive. Sur l'abaque de Smith, le point d'impédance obtenu se trouve sur le cercle de R constant passant par le point d'origine.
- L'utilisation d'une réactance parallèle ne modifie pas la valeur conductive ( $G=1/R$ ). Sur l'abaque de Smith, le point d'admittance obtenu se trouve sur le cercle de G constant passant par le point d'origine.
- L'utilisation d'une ligne en transmission modifie à la fois la résistance et la réactance ou la conductance et la susceptance. Sur l'abaque de Smith le point d'impédance (ou d'admittance) obtenu se trouve sur le cercle de ROS constant passant par le point d'origine.
- En cas de pertes dans les composants, les cercles se transforment en spirales qui tendent à rejoindre la référence  $Z_0$  (le centre de l'abaque de Smith) qui correspond à l'impédance réelle que l'on veut obtenir (les pertes sont les amies du ROS).

Dans le prochain "Comment ça marche ?" nous verrons le remplacement dans les circuits électroniques V-UHF d'un condensateur ou d'une bobine par un tronçon de ligne.

**La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".**

## Bibliographie.

[1] "Le CapaMatch" (F6TYM), Radio-REF, décembre 2016. Comparer la figure 8 avec notre figure 4 pour voir les différences sur l'abaque de Smith entre les méthodes d'adaptation par composants discrets et par lignes.

[2] "Les circuits réactifs : 6 - Mesure de l'impédance (1)", "Comment ça marche ?" de juillet 2014. Si d'autres notions vous semblent mystérieuses, lire les précédents "Comment ça marche ?" sur les circuits réactifs et les lignes. Ils sont consultables et téléchargeables sur le site de F6KRK : "[www.blog.f6krk.org](http://www.blog.f6krk.org)", catégorie "Bulletins et Gazettes" puis "Comment ça marche ?".

## Notes :

- 1) *Les pertes entraînent une partie "active" dans la valeur de l'impédance. Son rapport avec la partie "réactive" détermine un facteur de qualité  $Q$  comparable à celui des circuits L-C. Pour une longueur qui tend vers  $\lambda/4$ , la courbe tend alors vers une valeur finie, d'autant plus faible que le  $Q$  est faible.*
- 2) *Pour connaître l'impédance complexe de son antenne. On peut la mesurer, avec toutes les précautions nécessaires, à l'aide d'un impédancemètre ou d'un VNA. On peut aussi la modéliser dans un logiciel simulateur d'antenne qui nous donnera son impédance complexe théorique, à condition que le logiciel prenne en compte un sol réel, ce qui n'est pas le cas pour tous les simulateurs gratuits utilisés par les radioamateurs.*
- 3) *Nous avons utilisé un abaque de Smith détaillé de grand format.*
- 4) *Ce serait plus court avec une ligne de  $600 \Omega$  (15,73 m), mais elle serait impossible à construire en version asymétrique.*
- 5) *Pour  $Z_0=50\Omega$ , nous avons  $C=66,67\text{pF/m}$  et  $L=166,7\text{nH/m}$  (racine de  $(166,7/0,0667) = 50$ ). Alors  $L = 1,78/0,1667 = 10,68 \text{ m}$  ( $0,0659\lambda$ ). La figure 1 indique qu'il faut appliquer un coefficient de raccourcissement de 1,1 environ ce qui nous donne une longueur électrique de 9,71 m, à multiplier par le coefficient de vitesse du RG213 qui est de 0,667, ce qui donne une longueur physique de 6,47 m.*